

# Rapport de stage - LAPP

11 juin 2015

## Résumé

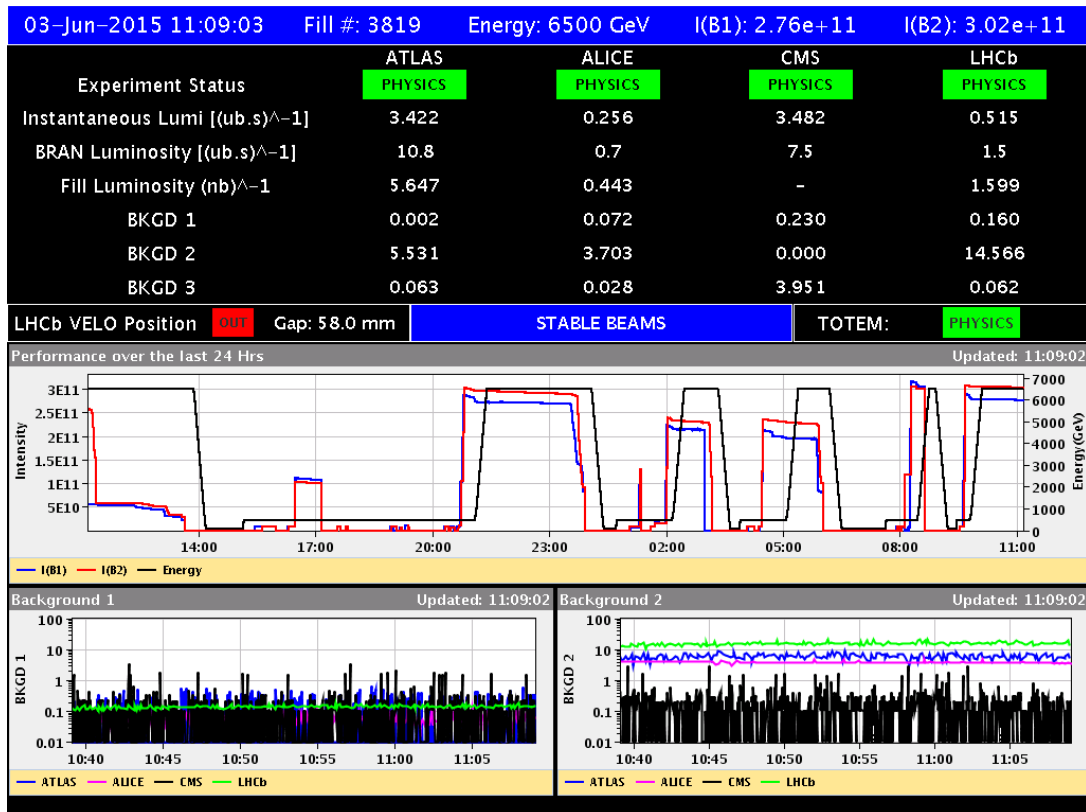
brouillon ; TODO : partie personnelle : travail avec root : étude préliminaire sim MC, travail données etc partie générale : présentation LHC/atlas ...

## 1 Le LHC

### 1.1 Schedule

Run1, 2, ..., HL...

FIGURE 1 – Statut du LHC et des faisceaux pour chaque expérience. « Physics » signifie que l'expérience collecte actuellement des données qui seront utilisées dans l'analyse des résultats. Le graphe représente l'énergie de fonctionnement du LHC ( $\frac{\sqrt{s}}{2}$ ) et la luminosité des faisceaux.



## 2 Le modèle standard

### 2.1 Généralités

FIGURE 2

spin masse · c <sup>2</sup>	charge/e		
symbole			
nom			
<b>Particules élémentaires du modèle standard</b>			
<b>Quarks</b>			<b>Bosons</b>
1/2 1,5-4 MeV	+2/3	<b>u</b> up	0 0 <b>γ</b> photon
1/2 1,15-1,35 GeV	+2/3	<b>c</b> charm	1 0 <b>g</b> gluon
1/2 173,3±0,8 GeV	+2/3	<b>t</b> top	0 0 125,36±0,41 GeV <b>H</b> Higgs
1/2 4-8 MeV	-1/3	<b>d</b> down	1 ±1 80,385±0,015 GeV <b>W</b> Weak
1/2 80-130 MeV	-1/3	<b>s</b> strange	0 0 91,187±0,002 GeV <b>Z</b>
1/2 4,1-4,4 GeV	-1/3	<b>b</b> bottom	
<b>Leptons</b>			
1/2 511 keV	-1	<b>e</b> electron	
1/2 105,66 MeV	-1	<b>μ</b> muon	
1/2 1,777 GeV	-1	<b>τ</b> tau	
1/2 <2,5 eV	0	<b>ν<sub>e</sub></b> neutrino e	
1/2 <170 keV	0	<b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino μ	
1/2 <18 MeV	0	<b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino τ	
<b>Neutrinos</b>			

## 3 Boson de Higgs

### 3.1 Caractéristiques

Le boson de Higgs est une particule élémentaire du modèle standard de masse  $\simeq 125$  GeV et de spin nul et dont l'existence a été confortée par les résultats des expériences CMS et Atlas. Son existence a été suggérée en 1964 afin de proposer une explication cohérente avec le modèle standard d'une masse non nulle pour les bosons de jauge  $W^\pm$  et  $Z$ .

### 3.2 Formation

Il existe de nombreux processus entrainant la production de boson de Higgs. En voici des exemples envisageables ainsi que leur section efficace associée dans les conditions du LHC

(Run1,  $\sqrt{s} = 8$  TeV).

### 3.2.1 Fusion gluon gluon ( $gg \rightarrow H$ )

La fusion gluon gluon est le mode de production du Higgs le plus important.

La section efficace totale du processus est de 19,23 pb à  $\sqrt{s} = 8$  TeV et 43,94 pb à  $\sqrt{s} = 13$  TeV[1]

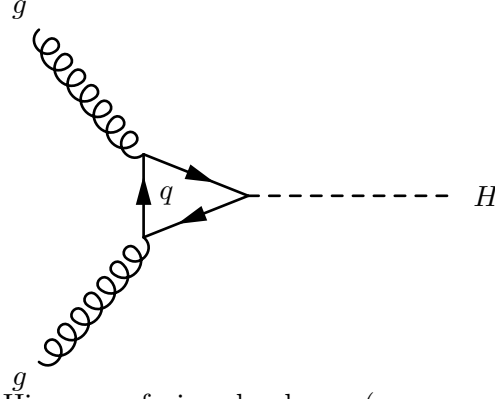


FIGURE 3 – Formation d'un Higgs par fusion de gluons (avec apparition de quarks virtuels, préférentiellement lourds).

### 3.2.2 Vector Boson Fusion (VBF, $ff \rightarrow ffH$ )

La section efficace du processus VBF est de 1,58 pb à  $\sqrt{s} = 8$  TeV et 3,75 à  $\sqrt{s} = 13$  TeV. Il s'agit du second mode de production du Higgs le plus probable.

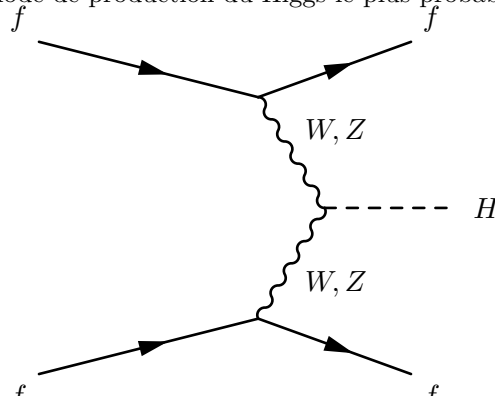


FIGURE 4 – Formation d'un Higgs par fusion de bosons  $W$  ou  $Z$  virtuels échangés entre deux fermions.

### 3.2.3 Higgs Strahlung ( $f\bar{f} \rightarrow WH$ ou $ZH$ )

La section efficace totale pour ce processus est  $\sigma = \sigma_W + \sigma_Z = 0,7 + 0,4 = 1,1$  pb à  $\sqrt{s} = 8$  TeV et  $\sigma = 2,3$  à  $\sqrt{s} = 13$  TeV

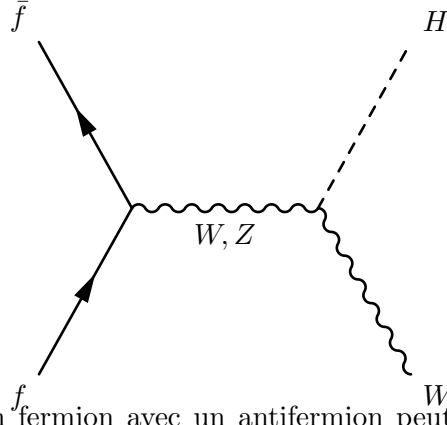


FIGURE 5 – La collision d'un fermion avec un antifermion peut produire un boson  $W$  ou  $Z$  pouvant émettre un  $H$ .

### 3.2.4 Top/bottom fusion (ex : $gg \rightarrow q\bar{q}H$ , $q = t, b$ )

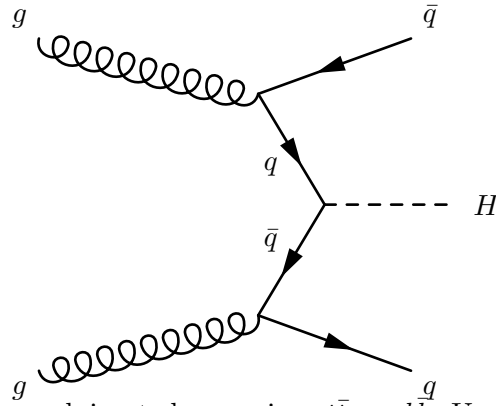


FIGURE 6 – Ici, deux gluons produisent deux paires  $t\bar{t}$  ou  $b\bar{b}$ . Une d'entre elles fusionne et produit un  $H$ . Il s'agit d'un processus mineur ( $\sigma = \sigma_b + \sigma_t = 0,20 + 0,13 = 0,33$  pb à 8 TeV et  $\sigma = \sigma_b + \sigma_t = 0,6 + 0,6 = 1,2$  pb à 14 TeV)

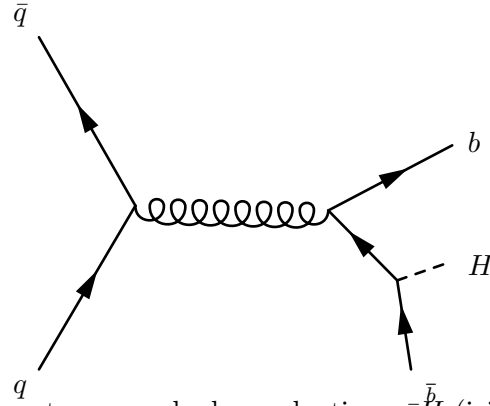


FIGURE 7 – Un autre exemple de production  $q\bar{q}H$  (ici  $q\bar{q} \rightarrow b\bar{b}H$ )

Ces processus sont l'objet d'une attention particulière, malgré leur faible section efficace. En effet, ils introduisent un couplage direct entre  $H$  et des quarks lourds. L'intensité de ce couplage étant proportionnelle à la masse des quarks, elle est très forte dans le cas des top. Etudier ces événements permettrait donc une mesure directe du couplage  $H$  - fermion à des masses élevées. [2]

### 3.2.5 Section efficace totale $pp \rightarrow H$

$\sqrt{s}$ (TeV)	$\sigma_{pp \rightarrow H}$ (pb)
7	17,5
8	22,3
13	50,9
14	58.0

FIGURE 8 – Section efficace totale pour le processus  $pp \rightarrow H$  en fonction de l'énergie des faisceaux. Augmenter l'énergie augmente  $\sigma_H$  de façon significative.

### 3.3 Désintégration

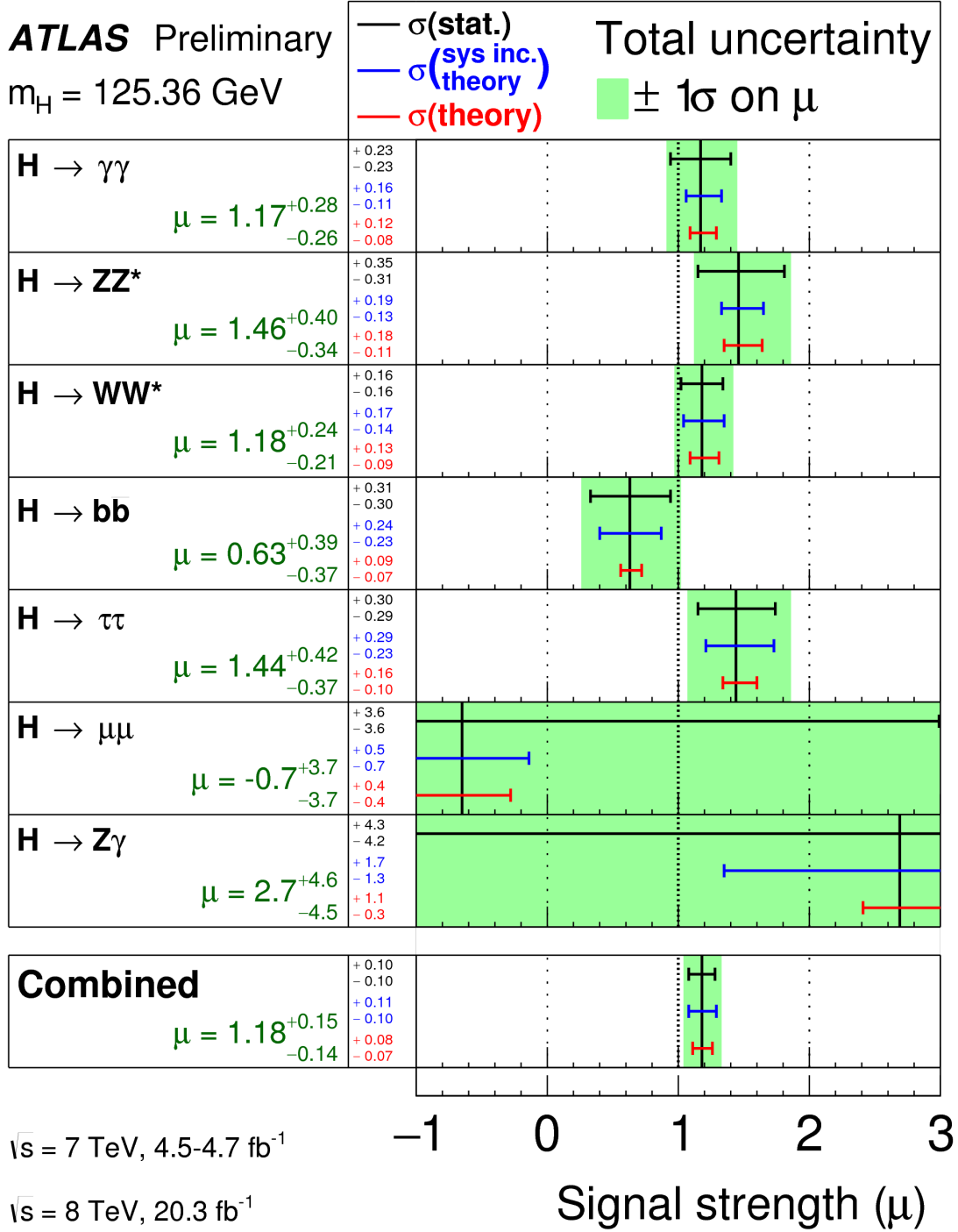
Type	Exemple	Ratio de branche
$H \rightarrow \text{fermions}$	$H \rightarrow b\bar{b}$	57,7 %
	$H \rightarrow \tau\bar{\tau}$	6,4 %
	$H \rightarrow \mu\bar{\mu}$	0,02 %
$H \rightarrow \text{bosons de jauge}$	$H \rightarrow WW$	21,5 %
	$H \rightarrow ZZ$	2,63 %
	$H \rightarrow \gamma\gamma$	0,23 %

FIGURE 9 – Différents modes de désintégration possibles pour le Higgs, ainsi que leur probabilité respective.

### 3.4 Produits de désintégration et choix de méthode d'observation

Pour détecter la présence d'un boson de Higgs parmi un évènement il faut étudier ses produits de désintégrations et vérifier qu'ils sont compatibles avec un  $H$ . Il faut pour cela que les particules produites soient détectables et que l'on puisse mesurer leurs paramètres cinématiques avec suffisamment de précision.

FIGURE 10 – Résultats de l'expérience Atlas sur la détection du Higgs à travers sa désintégration par différents modes. Les signaux extraits sont comparés aux valeurs attendues selon le modèle standard.



### 3.4.1 $H \rightarrow \gamma\gamma$

La désintégration du Higgs en deux photons est une méthode d'observation privilégiée. Bien que le ratio associé à cette branche soit très faible (2 pour 1000), ce qui implique que peu de Higgs formés seront observables de cette façon, il est plus facile de détecter de tels photons avec une grande précision sur leur énergie et direction. La connaissance précise de l'impulsion de la paire de photons permet alors de remonter à la masse d'un Higgs dont ils seraient issus simplement (il s'agit de la masse invariante du système formé par la paire). Un inconvénient de ce canal est qu'il n'aurait pas permis de détecter un Higgs lourd ( $> 200$

GeV).

$\sqrt{s}$ (TeV)	$\sigma_{pp \rightarrow H \rightarrow \gamma\gamma}$ (fb)
7	40
8	51
13	117
14	133

FIGURE 11 – Sections efficaces associées à la désintégration d'un Higgs en  $\gamma\gamma$ , en fonction de l'énergie du faisceau.

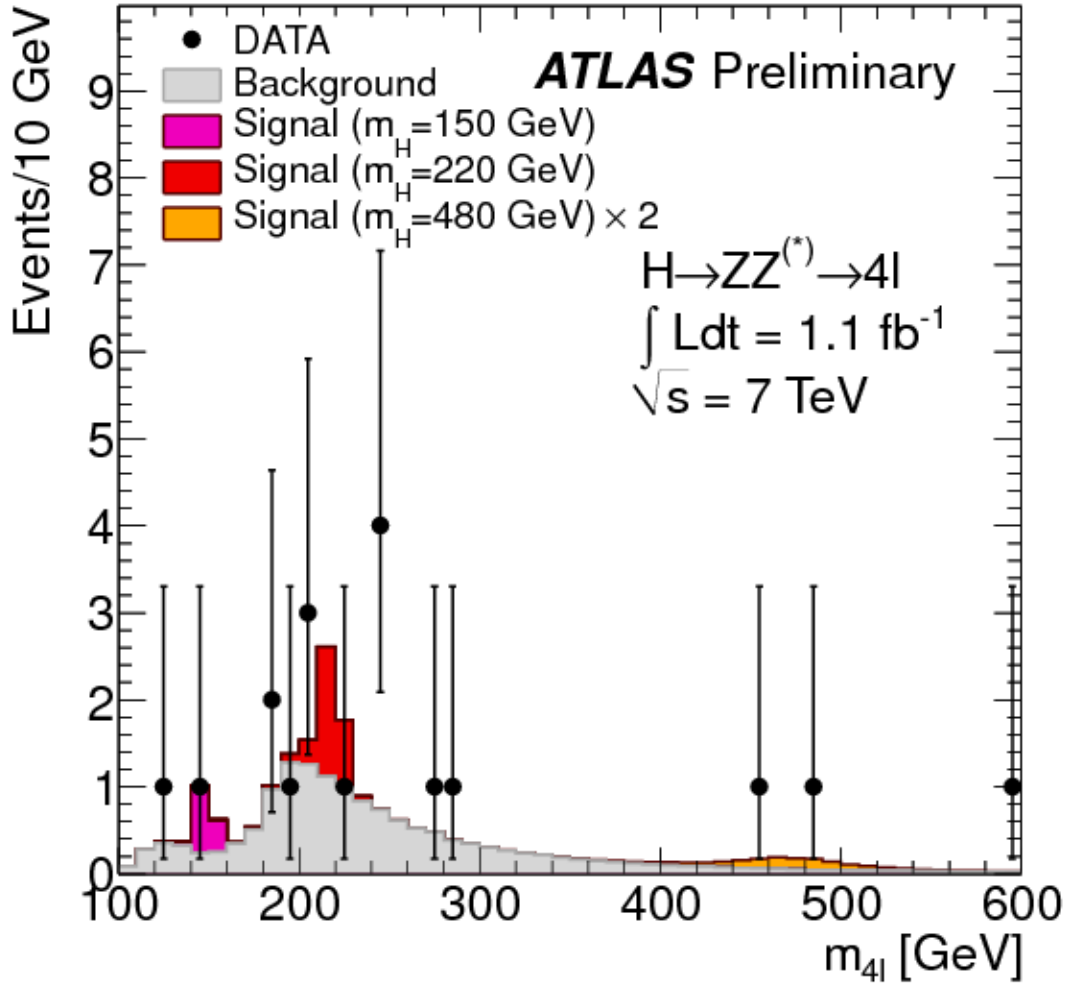
### 3.4.2 $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell\ell\ell$

Une autre voie privilégiée est la désintégration successive d'un  $H$  en une paire de  $Z$  puis 4 leptons ( $4e$ ,  $4\mu$  ou  $2e2\mu$ ). Bien que la section efficace totale d'un tel processus soit encore inférieure à celle de la voie  $\gamma\gamma$  aux alentours de 125 GeV (la probabilité qu'un  $Z$  se désintégrant en paire  $ee$  ou  $\mu\mu$  étant de 3,4 % seulement), cette méthode est très intéressante en raison d'un excellent rapport signal/bruit et d'une précision correcte sur la masse reconstruite. De plus, dans l'hypothèse d'un Higgs lourd, les désintégrations d'un Higgs en paire de  $Z$  deviennent très probables, et le bruit de fond très faible.

$\sqrt{s}$ (TeV)	$\sigma_{pp \rightarrow H \rightarrow 4\ell}$ (fb)
7	2,2
8	2,7
13	6,2
14	7,0

FIGURE 12 – Sections efficaces associées à la désintégration d'un Higgs en  $ZZ$  puis  $4\ell$ , en fonction de l'énergie du faisceau.

FIGURE 13 – Signal et bruit de fond attendus pour différentes masses du Higgs dans le canal  $4\ell$



### 3.4.3 $H \rightarrow W^+W^-$

### 3.4.4 $H \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow \ell\ell, \ell\text{-jet ou jet-jet}$

La désintégration d'un H en paire  $\tau^+\tau^-$  offre une autre voie d'observation du Higgs. Elle pose cependant des difficultés : les particules  $\tau$  ne sont pas détectables directement. Elles sont donc reconstruites à partir de leurs produits de désintégrations. Ces produits sont des hadrons (identifiables par des 'jets') dans 65 % des cas environ et des leptons dans les 35 % des cas restants. Cela implique une reconstruction à partir d'au moins un jet dans 90 % des cas, qui sont soumis à un bruit de background important. De plus, au moins un neutrino est émis (en vertu de la conservation du nombre tauonique) lors d'une désintégration d'un  $\tau$ , et un de plus lorsqu'il se désintègre en un autre lepton, ce qui pose problème pour la reconstruction des masses et impulsions puisque les neutrinos ne sont pas détectables.

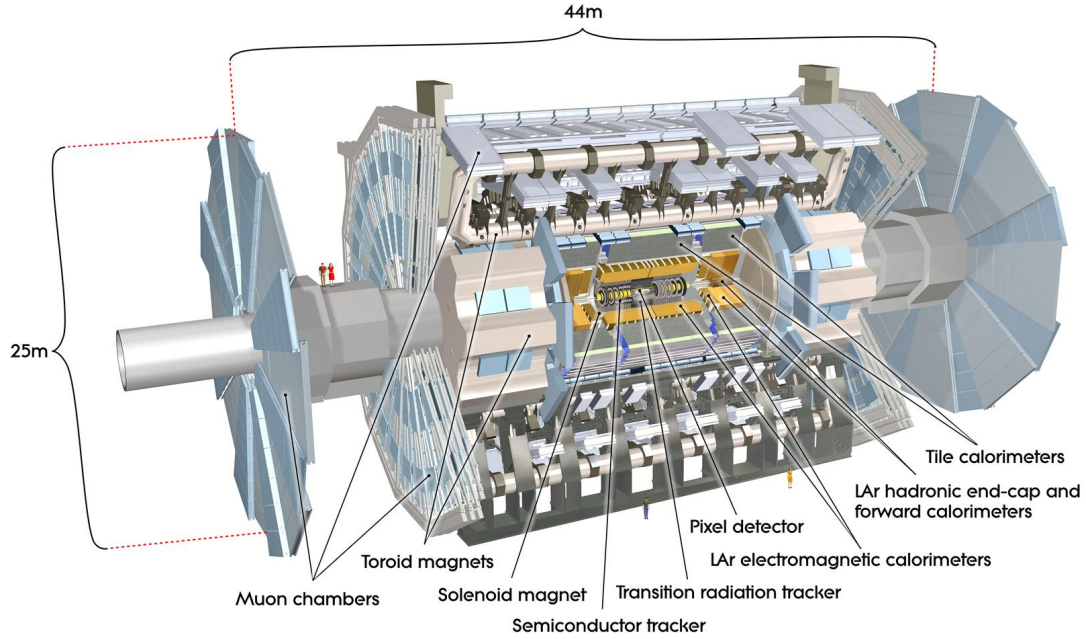


## 4 Atlas

### 4.1 Objectifs de l'expérience

### 4.2 Détecteurs

FIGURE 14 – Schéma du détecteur Atlas



TODO : tableau : composant, fonction, fonctionnement.

### 4.3 Performance

#### 4.3.1 Résolution en énergie du calorimètre EM

TODO : expliquer les facteurs limitant la résolution et justifier

$$\frac{\sigma_E}{E} \simeq \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c \quad (1)$$

Puisque  $b \ll 10$  GeV, aux énergies qui nous intéressent :

$$\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus c \quad (2)$$

A l'aide des simulations Monte-Carlo, on estime la résolution en énergie en fonction de l'énergie des photons mesurés, afin de vérifier si ce comportement est bien reproduit. (fig. 15).

Photons convertis inclus	$\eta$	$a(\text{GeV}^{1/2})$	$c$
Oui	tous	$17,5 \% \pm 0,8 \%$	$0,64 \% \pm 0,04$
Non	tous	$13,4 \% \pm 0,8 \%$	$0,79 \% \pm 0,04$
Oui	$ \eta  < 1$	$9,6 \% \pm 0,6 \%$	$0,92 \% \pm 0,04$
Oui	$ \eta  > 1,5$	$12,6 \% \pm 2,4 \%$	$1,8 \% \pm 0,2$

TODO :  $\pm$  peu pertinents (uniquement err fit) et valeurs en fct de  $\eta$  peu pertinentes

FIGURE 15 – Les énergies des photons 'tight' (convertis ou non) reconstruits sont comparées aux photons réels.

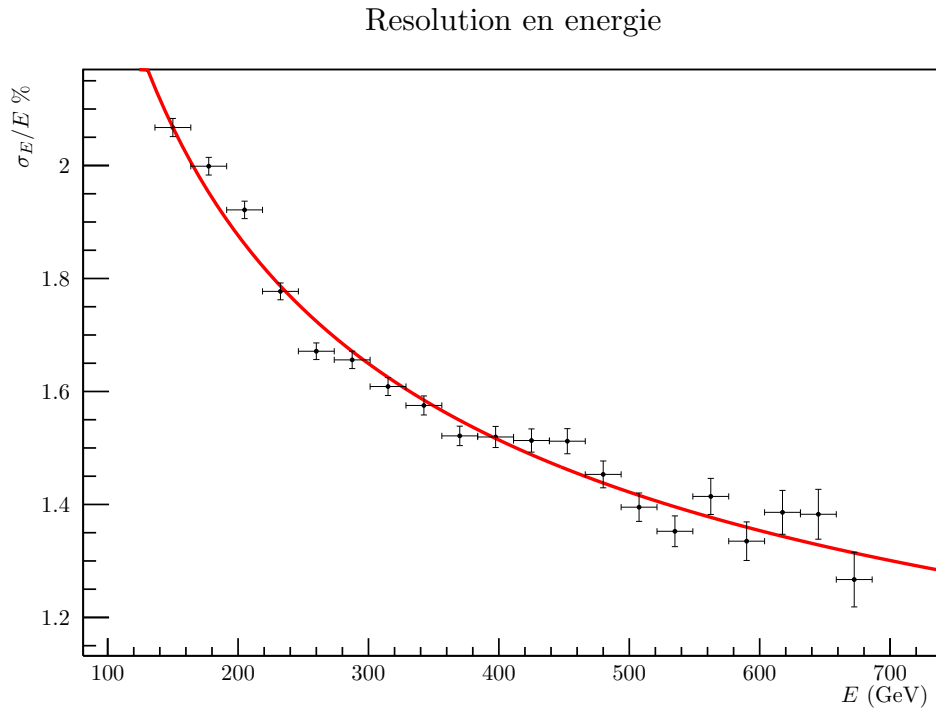
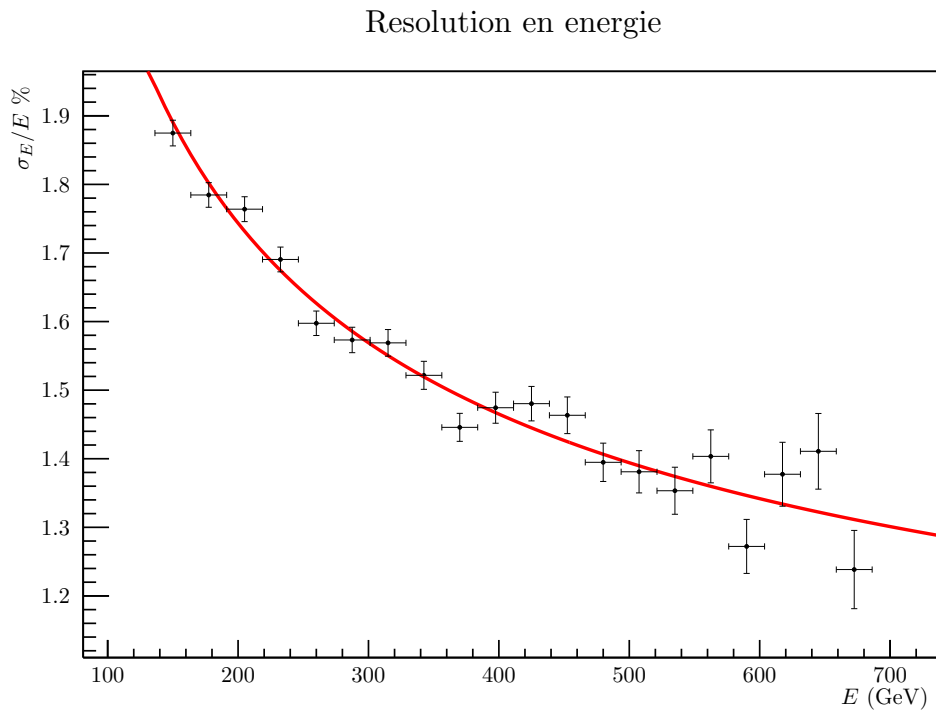


FIGURE 16 – Les énergies des photons 'tight' non convertis reconstruits sont comparées aux photons réels.



#### 4.4 Efficacite reco $\gamma$

Il est nécessaire de tester l'efficacité du détecteur (c'est-à-dire sa capacité à détecter et reconstruire des évènements) pour plusieurs raisons :

- Cela permet d'estimer la possibilité d'établir des conclusions physique pour une taille d'échantillon donnée
- Cela peut renseigner sur l'influence de certains paramètres sur les performances des détecteurs et éventuellement de corriger des biais

FIGURE 17 – Efficacité de sélection des paires de photons 'tight' en fonction de  $\eta$ . La zone de « crack » est bien apparente sur cette figure.

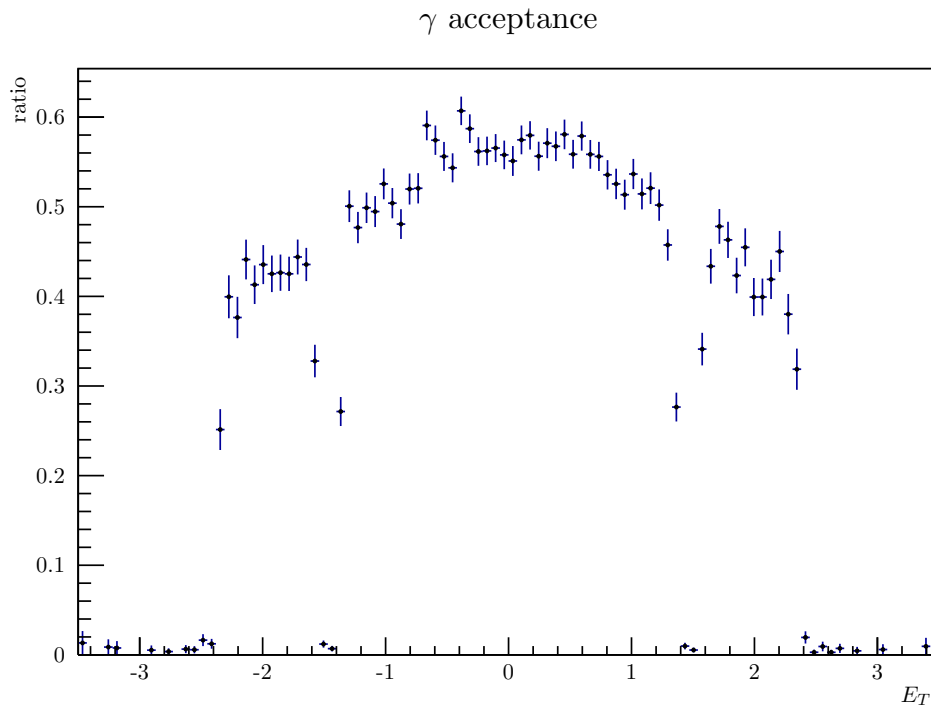


FIGURE 18 – Efficacité de sélection des photons en fonction de l'énergie transverse  $E_t$ .

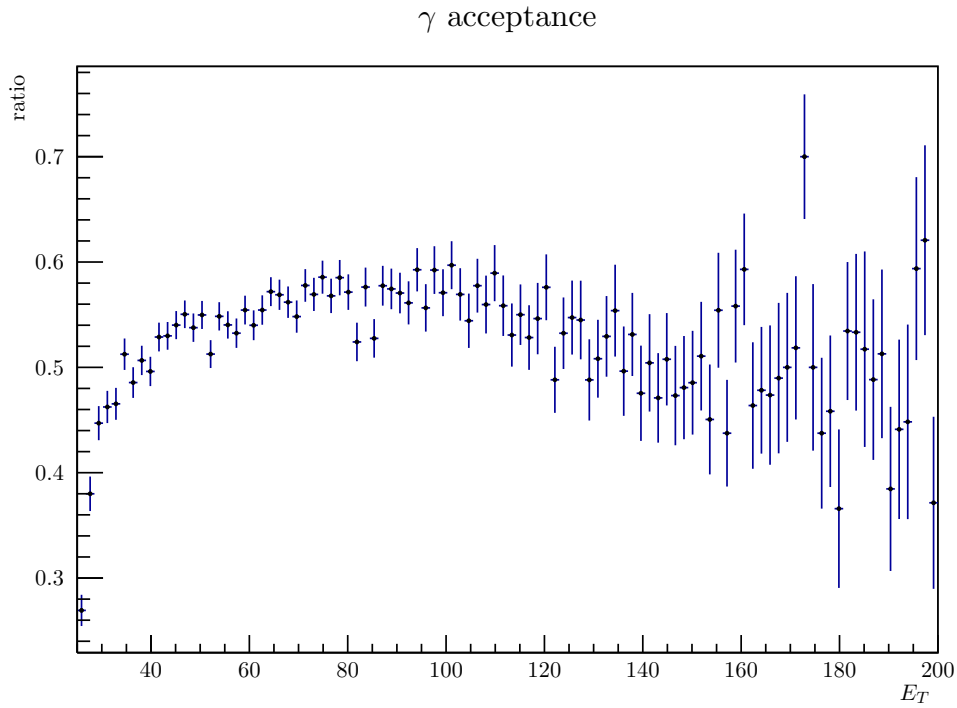


FIGURE 19

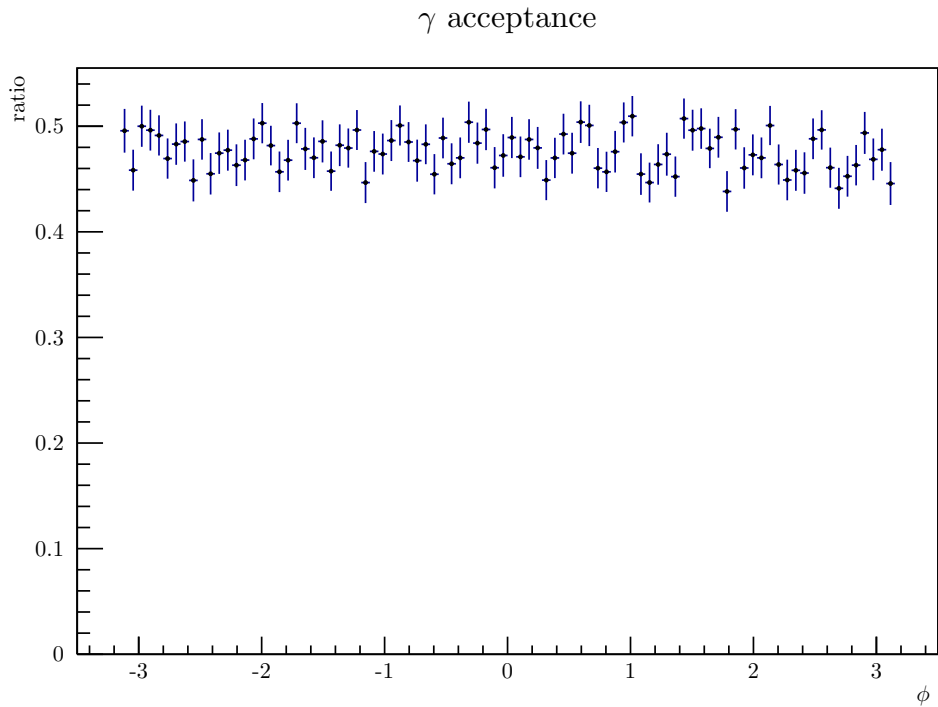


FIGURE 20 – Efficacité de sélection des photons en fonction de  $\phi$ . On constate que celle ci est constante sur  $[-\pi, \pi]$  ce qui est attendu pour des raisons de symétrie.

## 5 Données

### 5.1 Etude de données simulées

Afin de mieux comprendre les caractéristiques du signal attendu et les celles du détecteur, on travaille sur un échantillon de données comprenant des évènements simulés (méthode de Monte Carlo) et les évènements associés tels qu'ils seraient reconstruits par Atlas.

L'échantillon étudié ici se restreint à la production de  $ZH$  et à leur désintégration.

Dans ce cas, on s'intéresse d'une part aux paires de photons issues des désintégrations de Higgs, et aux paires de leptons ( $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ )

### 5.2 Calcul de la masse invariante d'un système à deux particules.

En connaissant l'énergie des photons produits de la désintégration du Higgs selon la forme  $H \rightarrow \gamma\gamma$ , on peut retrouver sa masse. Elle est en effet égale à la masse invariante du système

$$m_{\text{inv}}^2 = E^2 - \mathbf{p}^2 \quad (3)$$

Pour deux photons, ou par approximation pour des particules très énergétiques<sup>1</sup>,  $E_{\gamma_1} = p_{\gamma_1}$  et  $E_{\gamma_2} = p_{\gamma_2}$ , et alors :

$$m_{\gamma\gamma}^2 = 2(p_{\gamma_1}p_{\gamma_2} - \mathbf{p}_{\gamma_1} \cdot \mathbf{p}_{\gamma_2}) \quad (4)$$

Soit, en travaillant en coordonnées  $(\eta, \phi)$  :

$$m_{\gamma\gamma}^2 = 2E_{\gamma_1}E_{\gamma_2} [\cosh(\eta_{\gamma_1} - \eta_{\gamma_2}) - \cos(\phi_{\gamma_1} - \phi_{\gamma_2})] \quad (5)$$

Il s'agit alors de calculer cette masse pour tous les évènements contenant une paire de photons susceptible d'être issue d'un Higgs.

Puisque cette relation est vraie y compris pour des particules massives à haute énergie, on peut déterminer la masse du  $Z$  à partir des impulsions des leptons issus de sa désintégration.

Afin de déterminer l'impact de la limite en résolution énergétique et angulaire, on estime  $\Delta m_{\gamma\gamma}$ , en négligeant l'erreur sur  $\phi$  :

$$\Delta m_{\gamma\gamma} \simeq \frac{1}{2}m_{\gamma\gamma} \left( \frac{\sigma_{E_1}}{E_1} + \frac{\sigma_{E_2}}{E_2} \right) + \frac{E_1E_2 \sinh(\eta_1 - \eta_2)}{m_{\gamma\gamma}} (\sigma_{\eta_1} + \sigma_{\eta_2}) \quad (6)$$

Si un ordre de grandeur suffit :

$$\Delta m_{\gamma\gamma} \sim m_{\gamma\gamma} \left( \frac{\sigma_E}{E} + \sigma_\eta \right) \quad (7)$$

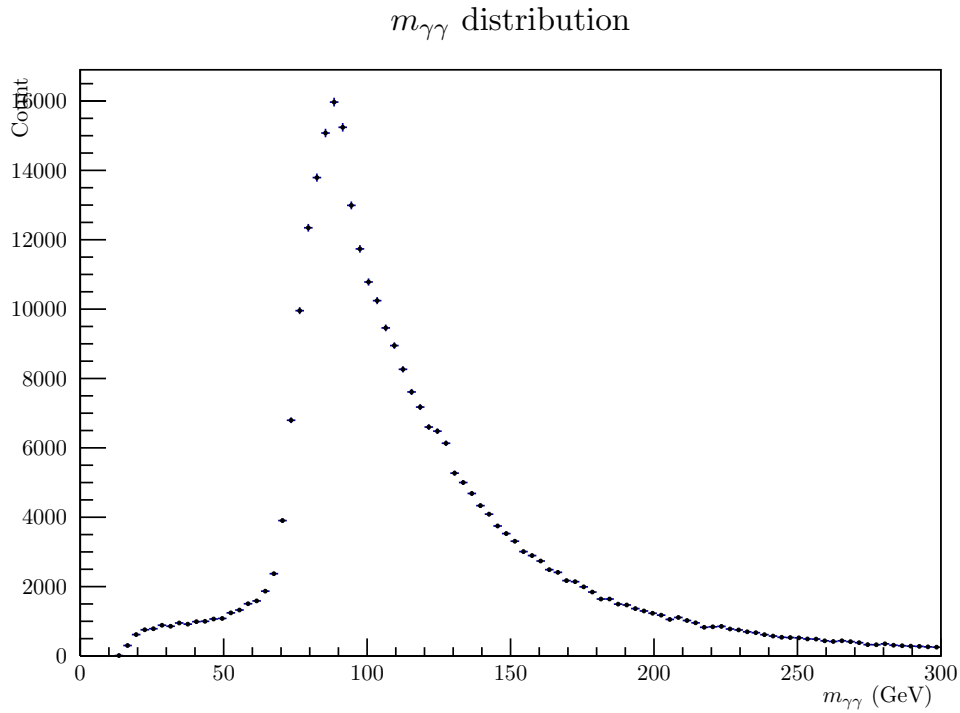
### 5.3 Calcul en situation

Parmi un échantillon de 310 000 évènements (constitués uniquement de paires de photons vérifiant le critère 'tight'), on calcule la distribution de masse invariante  $m_{\gamma\gamma}$ . On obtient le résultat suivant :

---

1. Ici, les particules les plus massives utilisées dans les calculs de masse invariante sont les muons, or  $m_\mu = 100 \text{ MeV} \ll 10 \text{ GeV}$ , l'ordre de grandeur des énergies des particules considérées

FIGURE 21 – Distribution  $m_{\gamma\gamma}$ . On observe un bruit important avec un pic aux alentours de 90 GeV (Z). Le signal correspondant au Higgs est à première vue difficilement distinguable. ( $\sqrt{s} = 8$  TeV,  $\int Ldt = 20,3 \text{ fb}^{-1}$ )

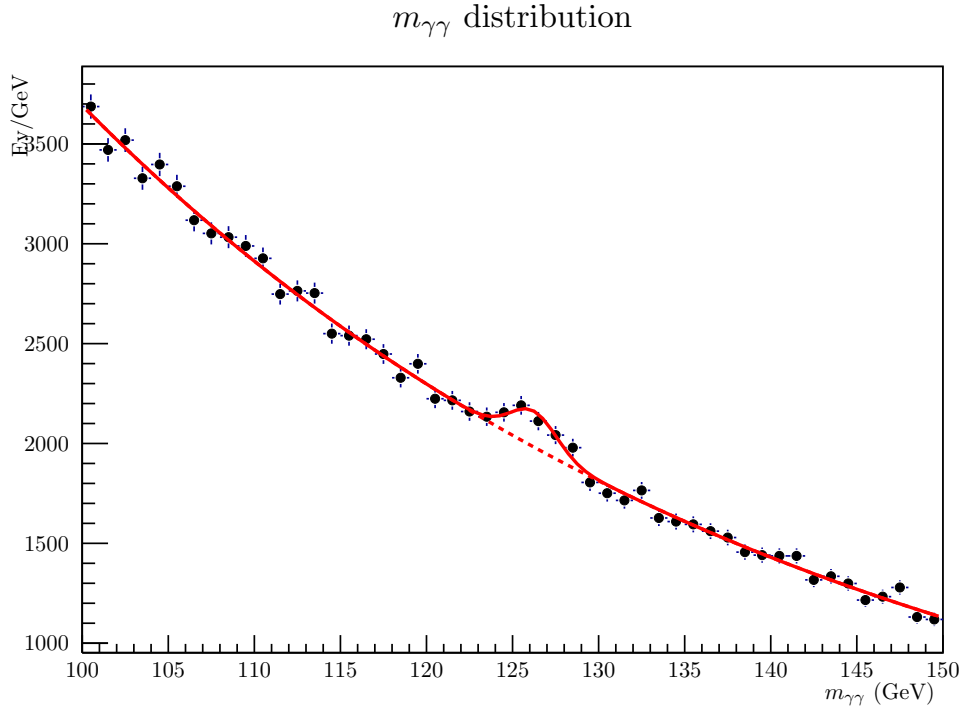


Afin d'extraire le signal correspondant au Higgs, on se restreint à la plage où il est attendu (100 - 150 GeV). Le 'background' y suit une forme exponentielle. On en réalise alors un fit sur une zone où le signal est considéré nul : ici on a choisi  $[100;120] \cup [130;150]$ . On obtient une fonction de la forme  $\text{background} = m_{\gamma\gamma} \mapsto \exp(\xi + \epsilon m_{\gamma\gamma})$ .

Puis, sur la plage complète  $([100, 150])$ , on réalise un fit des données à partir d'une fonction de la forme signal+background :  $m_{\gamma\gamma} \mapsto A \exp(-(m_{\gamma\gamma} - m_H)^2/2\sigma^2) + \exp(\xi + \epsilon m_{\gamma\gamma})$

On obtient la figure suivante :

FIGURE 22 – Distribution  $m_{\gamma\gamma}$  et fit background+signal. ( $\sqrt{s} = 8$  TeV,  $\int Ldt = 20,3 \text{ fb}^{-1}$ )



On peut en déduire les paramètres physiquement intéressants suivants :

Paramètre	Valeur	Erreur
$m_H$	126,3 GeV	0,3 GeV
$\sigma$	1,3 GeV	0,4 GeV
$A$	180 GeV <sup>-1</sup>	30
$N = \sqrt{2\pi}\sigma A$	586	200

La valeur  $m_H$  est la masse du Higgs ainsi mesurée. La valeur  $\sigma$  doit correspondre à la largeur du signal, mais elle est bien supérieure à la valeur théorique. Aux énergies considérées (environ 100 GeV),  $\sigma_\eta \sim 0,3\%$  [3] et  $\sigma_E \sim 1,5\%$ , soit une incertitude  $\Delta m_{\gamma\gamma}$  d'environ 2 GeV, du même ordre de grandeur que la largeur mesurée.

On calcule d'autre part la signification statistique d'après ces fits :  $\Delta\chi^2 = \chi_{\text{background}}^2 - \chi_{\text{signal+background}}^2 \simeq 155 - 107 \simeq 50$  soit une signification à  $\sqrt{\Delta\chi^2} \sigma = 7\sigma$

À partir de la quantité d'événements  $H \rightarrow \gamma\gamma$  détectés estimée, on peut calculer la luminosité intégrée associée :

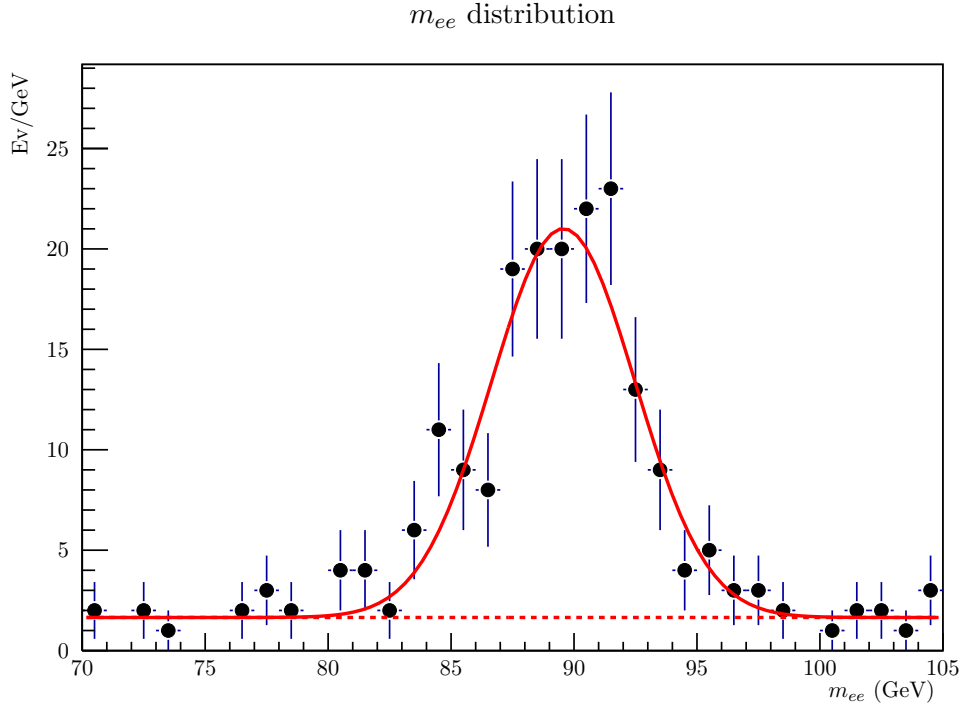
$$\int Ldt = \frac{N}{\xi\sigma} = \frac{586}{0,41 \times 51 \times 10^{-15}} = 28,7 \pm 9,8 \text{ fb}^{-1} \quad (8)$$

Cette résultat est compatible avec la valeur réelle ( $20,3 \text{ fb}^{-1}$ )

#### 5.4 Masse du $Z$

On s'intéresse cette fois aux événements comprenant une paire  $e^+e^-$  (et deux photons 'loose'). On calcule la masse invariante de la paire d'électrons et on obtient le graphe 23, après un fit du signal sous forme gaussienne et un bruit uniforme.

FIGURE 23 – Distribution  $m_{ee}$  et fit sur un intervalle où le signal domine (background plat).



On trouve alors :

Paramètre	Valeur	Valeur attendue
$m_Z$	$89,6 \pm 0,3$ GeV	91,2 GeV
$\sigma_Z$	$2,9 \pm 1,2$ GeV	2,5 GeV

La masse ainsi calculée est correcte. La largeur est bien plus importante que la valeur théorique. On s'attend à une largeur de la forme  $\sigma_{exp} \sim \sqrt{(\Delta m_{\gamma\gamma})^2 + \sigma_{SM}^2}$ . Les performances de résolution en énergie et directions étant similaires pour les électrons et photons dans le cas  $H \rightarrow \gamma\gamma$  et  $Z \rightarrow e^+e^-$ , on peut considérer que  $\Delta m_{\gamma\gamma}$  vaut environ 1,3 GeV également, donc la valeur de  $\sigma_{exp}$  attendue est de 2,8 GeV ce qui est proche de la valeur trouvée (2,9 GeV).

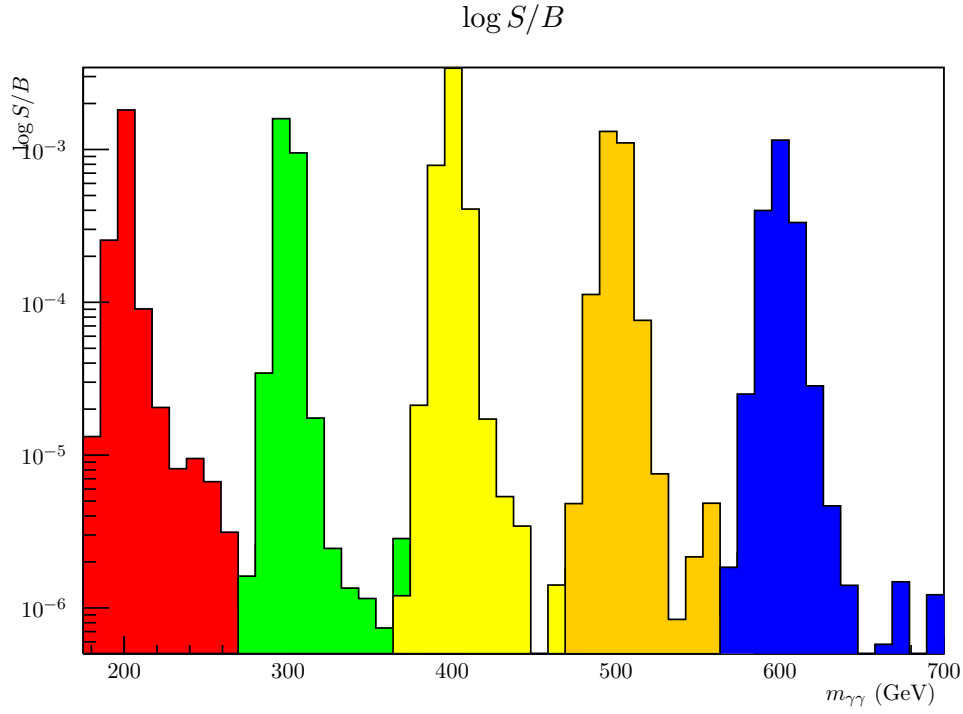
## 5.5 Recherche de résonances à des masses supérieures

### 5.5.1 Hypothèse $m_H > 125$ GeV selon le modèle standard

En connaissant les sections efficaces et ratios de branche du Higgs en fonction de sa masse, et en extrapolant le fit de bruit de fond mesuré à des masses élevées, on peut estimer le ratio signal/bruit de fond pour des scénarios avec un boson de Higgs plus lourd. Cela permet de montrer que le canal  $H \rightarrow \gamma\gamma$  n'est pas approprié à la détection de Higgs lourd. Sur la figure ??, on peut en effet constater que le ratio S/B ne dépasse pas 0,01. De plus, le run 1 du LHC n'aurait produit qu'environ 8 événements  $H \rightarrow \gamma\gamma$  pour  $m_H = 200$  GeV (et aucun pour 300+GeV).

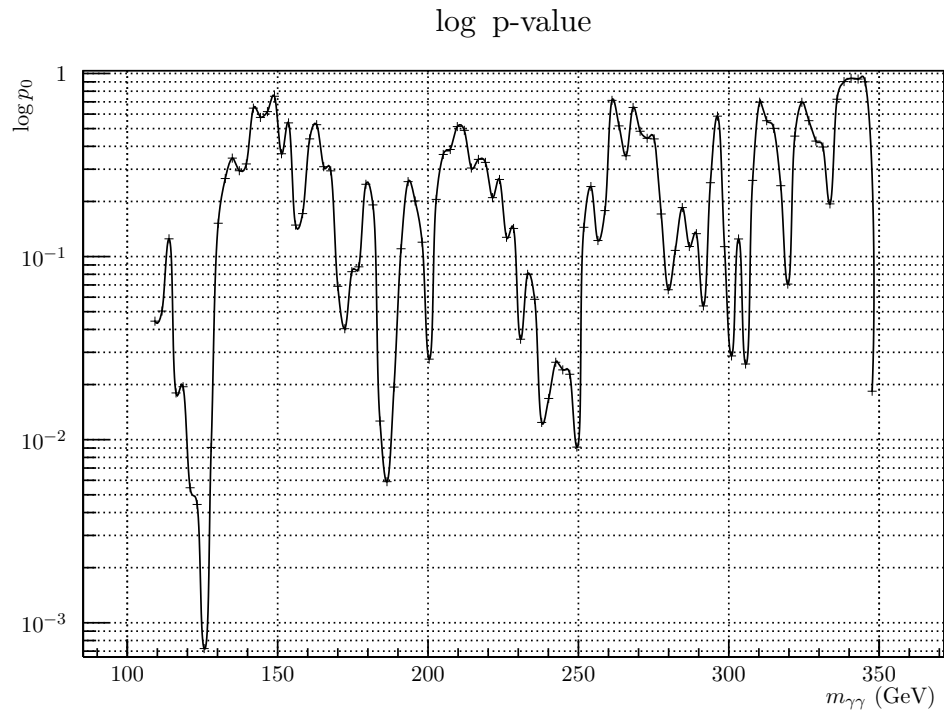


FIGURE 24 – Pour  $\sqrt{s} = 8$  TeV, on calcule le rapport entre le signal attendu (monte-carlo) et le bruit de fond, pour  $m_H = 200, 300, 400, 500$  et  $600$  GeV.



### 5.5.2 Recherches de résonances supplémentaires

FIGURE 25 – p-value associée à l'hypothèse signal nul. On observe un minimum aux alentours de 125 GeV (correspondant au Higgs). Aucune fluctuation significative n'est repérable pour d'autres masses.



## Références

- [1] Higgs cross sections and decay branching ratios. [https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/CrossSections#Higgs\\_cross\\_sections\\_and\\_decay\\_b](https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/CrossSections#Higgs_cross_sections_and_decay_b), 2014. [Online].
- [2] Jung Chang, Kingman Cheung, Jae Sik Lee, and Chih-Ting Lu. Probing the top-yukawa coupling in associated higgs production with a single top quark, 2014.
- [3] J. Colas, L. Di Ciaccio, M. El Kacimi, O. Gaumer, M. Gouanère, D. Goujdami, R. Lafaye, C. Le Maner, L. Neukermans, P. Perrodo, L. Poggioli, D. Prieur, H. Przysiezniak, G. Sauvage, I. Wingerter-Seez, R. Zitoun, F. Lanni, H. Ma, S. Rajagopalan, S. Rescia, H. Takai, A. Belymam, D. Benchebkroun, M. Hakimi, A. Hoummada, E. Barberio, Y. S. Gao, L. Lu, R. Stroynowski, M. Aleksa, J. Beck Hansen, T. Carli, P. Fassnacht, F. Gianotti, L. Hervas, W. Lampl, B. Belhorma, J. Collot, M. L. Gallin-Martel, J. Y. Hostachy, F. Ledroit-Guillon, P. Martin, F. Ohlsson-Malek, S. Saboumazrag, S. Viret, M. Leltchouk, J. A. Parsons, M. Seman, F. Barreiro, J. Del Peso, L. Labarga, C. Oliver, S. Rodier, P. Barrillon, C. Benchouk, F. Djama, P. Y. Duval, F. Henry-Couannier, F. Hubaut, E. Monnier, P. Pralavorio, D. Sauvage, C. Serfon, S. Tisserant, J. Toth, D. Banfi, L. Carminati, D. Cavalli, G. Costa, M. Delmastro, M. Fanti, L. Mandelli, M. Mazzanti, G. F. Tartarelli, K. Kotov, A. Maslennikov, G. Pospelov, Y. Tikhonov, C. Bourdarios, C. de La Taille, L. Fayard, D. Fournier, L. Iconomidou-Fayard, M. Kado, M. Lechowski, G. Parrou, P. Puzo, D. Rousseau, R. Sacco, N. Seguin-Moreau, L. Serin, G. Unal, D. Zerwas, B. Dekhissi, J. Derkaoui, A. El Kharrim, F. Maaroufi, A. Camard, D. Lacour, B. Laforge, I. Nikolic-Audit, P. Schwemling, H. Ghazlane, R. Cherkaoui El Moursli, A. Idrissi Fakhr-Eddine, M. Boonekamp, B. Mansoulié, P. Meyer, J. Schwindling, B. Lund-Jensen, and Y. Tayalati. Position resolution and particle identification with the ATLAS EM calorimeter. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 550 :96–115, September 2005.